

# 塔北油区岩石声发射全过程曲线类型及特征

邵兆刚 原辰

(中国地质科学院地质力学研究所)

**摘要** 本文讨论了岩石试样在加载全过程中的声发射特征,不同岩石声发射全过程曲线的分类以及类型的确定方法;对新疆塔里木盆地北部油区井下和地表试样进行了统计、分类,确定出该油区泥岩、砂岩声发射全过程曲线存在 I、III 两种类型;白云岩、灰岩、玄武岩声发射全过程曲线具有 I 型特征。

**关键词** 声发射 凯瑟效应 地应力

## 1 岩石声发射全过程特征

声发射 (Acoustic Emission) 产生于材料的受力和变形过程中,是材料内部储存的应变能快速释放时所产生的弹性波。自 50 年代初德国学者凯瑟 (Kaiser) 首先发现金属材料中的声发射现象存在凯瑟效应以来,声发射凯瑟效应在许多方面得到了应用。岩石同金属一样存在凯瑟效应<sup>[1]</sup>。所谓凯瑟效应是指:材料在经受一次或多次加载—卸载过程后,若再对其进行加载时,只要未达到先前所施加的最大应力值,则很少出现声发射,只有超过先前的最大应力值才有显著的声发射活动。人们利用岩石的凯瑟效应进行地应力测量。岩石在受压过程中的声发射现象直接与岩石经历的应力状态有关,而岩石本身的性质亦对声发射产生影响,因此,认识不同岩性的声发射全过程特征与声发射法地应力测量关系密切。岩石声发射全过程是指将试样加压至破坏的全过程声发射累积数对外加压应力的响应。本文将对几种不同性质的声发射全过程类型进行讨论。

在一般情况下,岩石试样在加载过程中所产生的声发射信号可分为 4 个阶段(图 1):① 开始对试样加载,试样原始裂纹逐渐闭合,并伴有较多的声发射信号出现,但通常这一阶段载荷值较低,一般外加压应力小于 10MPa(图 1 中 AB 段);② 继续加载,试样随载荷的增加开始稳定线性形变,声发射信号亦随载荷增加而平稳上升,但上升幅度较前阶段小,其范围是整个声发射全过程曲线中范围最大的阶段,同时也是声发射应力测量重点研究的阶段(图 1 中 BC 段);③ 裂纹稳定扩展阶段。随着载荷的逐渐增加,原始裂纹端部开始活动,声发射信号迅速上升,但整个试样结构还保持完整(图 1 中 CD 段);④ 裂纹不稳定扩展阶段。随着载荷的继续增加,试样中裂纹扩展幅度逐渐加大,声发射信号在 CD 段的基础上继续提高,岩石试样处于失

1997 年 6 月 20 日收稿,1997 年 12 月 23 日修改稿

国家自然科学基金资助项目 (49572144) 成果之一

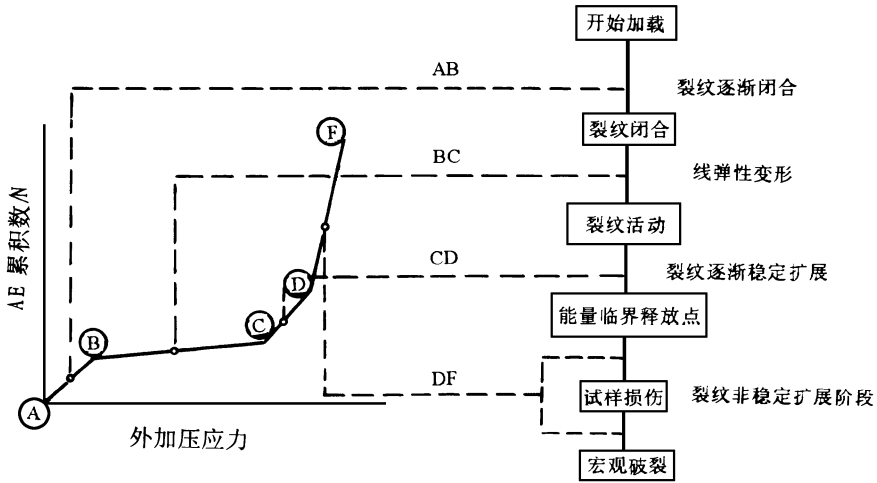


图 1 加载过程中岩石内部性质变化图(取自 Boyce<sup>[2]</sup>)

Fig. 1 Generalized stress versus acoustic emission signature and possible relationship to mechanisms of brittle rock fracture

## 2 岩石声发射全过程曲线类型

在实验观测中,不是所有岩石对上述声发射全过程 4个阶段均有明显反映,因岩石性质不同,试样在实验中所测量到的曲线往往仅反映上述 4个阶段中的 3个,甚至 2个阶段。例如某些砂岩声发射全过程实验曲线第一阶段无明显反映,而后 3个阶段却能很好反映。同一种岩石由于成岩环境不同,声发射的全过程曲线类型也会不同。

Boyce<sup>[2]</sup>测量了多种岩石的声发射全过程,并将多种岩石的声发射类型归并为 4类(图 2 表 1)。由表 1可见,岩石之间存在类型差别及过渡点位置的差别。同一岩石(如表 1中序号 G

表 1 单轴压缩下岩石声发射类型概要(取自 Boyce<sup>[2]</sup>)

Table 1 Summary of AE signatures of rocks tested in unconfined compression

序号	岩石类型	单轴抗压强度 $e_c$ (MPa)	AE类型	过渡点位置(单轴压缩强度 $e_c$ 的百分比)		
				AB至 BC	BC到 CD	CD至 DF
A	白云岩	241	I	6.6	70.1	90.8
B	页岩	57	III	...	47.3	90.1
C	云母片岩	19	III	...	41.0	80.0
D	片麻岩	71	I	14.7	79.4	88.2
E	大理岩	102	II	8.9	...	90.0
F	白云大理岩	96	I	14.3	82.1	96.2
G	花岗岩	160	I	4.3	84.8	94.2
H	页岩	168	II	10.8	...	95.5
I	云母片岩	67	III	...	68.7	87.8
J	石灰岩	64	IV	...	...	96.4

I云母片岩)其过渡点位置并不相同,甚至所属声发射类型也不相同(如表1中B、H页岩分别属于III型和II型)。

岩石声发射曲线类型及其过渡点位置的确定是声发射法应力测量的基础,特别是线弹性阶段(BC)的确定,可以防止过渡点与凯瑟点的混淆,提高应力测量的可靠性。同时,试样全过程类型的确定对实验过程、数据分析等方面均有很大帮助。

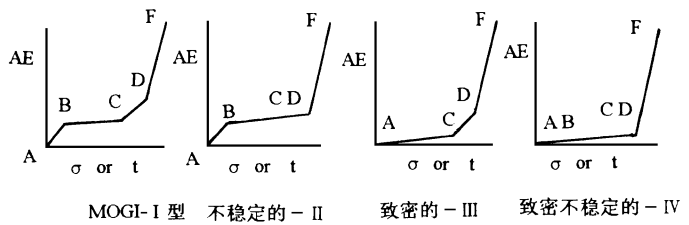


图2 岩石声发射类型(取自 Boyce<sup>[21]</sup>)

Fig. 2 Types for rocks in AE (after Boyce<sup>[21]</sup>)

### 3 声发射全过程曲线过渡点的确定

岩石试样声发射全过程曲线中过渡点的位置并不总是能明显地观察出来,所以在实际实验中,根据不同情况采用几种不同的方法来确定过渡点位置。主要有拐点法、单切线法、双切线法以及半对数法。

**拐点法:** 拐点法是最常用的一种方法,即直接根据曲线上的拐点判断过渡点的位置。当曲线形态较好时,B点表现为声发射累积数增加速率明显减弱,G、D点表现为明显增强。实验中I型岩石在达到B点后进入稳定阶段,此时声发射信号也显著减小,表现为声发射累积数增加速率减弱,曲线拐点特征明显且易于判断。C、D点在曲线特征明显时亦表现出很大的斜率变化,图3所示试样n137c采自塔北沙15井深5332m处,岩性为灰色粉砂质泥岩,单轴抗压强度133.5MPa,试样类型为I型,过渡点具明显拐点性质,利用拐点法可很容易判断过渡点位置。

**切线法:** 当外加压应力与声发射累积数响应曲线上拐点不明显时,可以采用切线法。当曲线各段特征较为明显,只是拐点不显著时,应用该方法较好。如对图4中C点进行判断,可对CD段

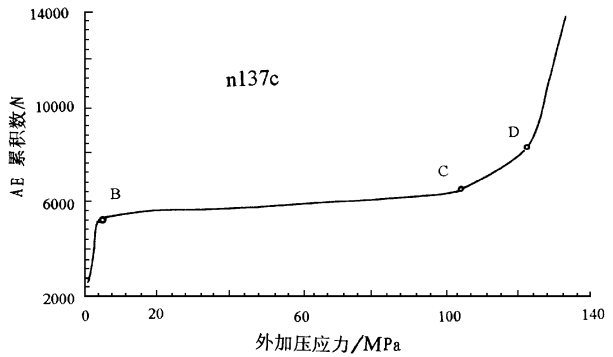


图3 利用拐点法判断过渡点B、G、D

Fig. 3 Determination of B, G, D by means of inflection point method

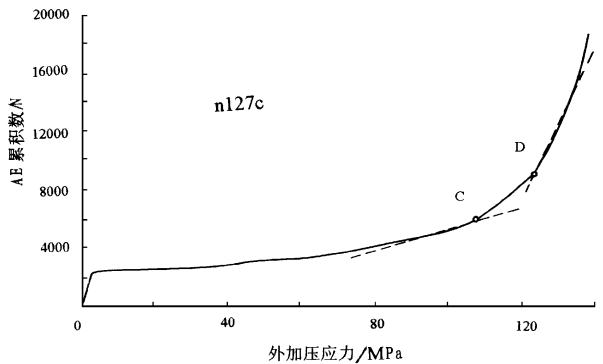


图4 利用切线法判断过渡点G、D

Fig. 4 Determination of G, D by means of tangent line method

作切线,左边切线离开曲线的那一点即为 C点。图 4给出了 n127c试样的全过程曲线,试样采自塔北沙 13井 5022m处,为奥陶系灰色微晶灰岩。图中显示I 型曲线特征,CD段上升较为圆滑,利用切线法可判断其过渡点位置(与单轴抗压强度  $\sigma_c$  的百分比)为 C点 90.0%、D点 94.3%,与灰岩统计结果有很好的一致性(见表 2)。

表 2 新疆塔北岩石试样声发射类型统计表

Table 2 AE type statistic table of rock specimens in the North Tarim Basin

岩性	单轴抗压强度 $\sigma_c$ (MPa)	AE曲线类型	AB- BC	BC- CD	CD- DF
白云岩	149.7	I	4.3%	79.4%	89.6%
玄武岩	129.1	I	4.9%	90.5%	96.1%
灰岩	165.4	I	2.9%	87.4%	94.5%
泥岩(1)	145.9	I	3.6%	84.3%	92.5%
泥岩(2)	110.8	III	—	87.0%	95.6%
砂岩(1)	151.0	I	3.5%	87.8%	94.5%
砂岩(2)	106.2	III	—	85.9%	93.6%

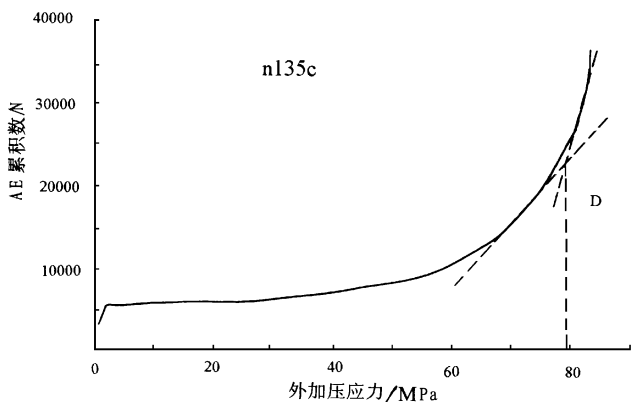


图 5 利用双切线法判断过渡点 D

Fig. 5 Determination of D by means of bitangent method

双切线法:若外加压应力与声发射累积数响应曲线上不能明显观察到声发射累积数随压力变化过渡点,此时可采用双切线法,根据两条切线的交点判断过渡点位置。图 5为 n135c试样全过程曲线,该试样为塔北沙 15井砂岩,埋深 5262m,单轴抗压强度 83.1MPa。利用双切线法对 CD段两侧分别作切线,两切线交点为 D点位置。图中 D点位置(与单轴抗压强度  $\sigma_c$  的百分比)为 95.2%,与I 型砂岩 D点的统计结果(94.5%)相符。

半对数法:即以线性压力相对于对数声发射累积数作图。根据声发射累积数斜率增长的特征判断过渡点,主要用于 G D点的判断。该方法可将圆滑上升的曲线转换为不同斜率的直线,不同直线的交点则为过渡点位置。图 6给出 n127c试样半对数法判断 G D点,其结果和图 4有良好一致性。

上述过渡点判断方法可以根据曲线的具体形态决定,也可以分别用几种不同方法取平均值。通常利用拐点法判断 B点位置效果较好,C点位置利用拐点法和切线法判断,双切线法和半对数法可以对 D点位置进行判断,若曲线形态较好也可利用拐点法判断。

## 4 塔北油区岩石试样声发射全过程类型

在实验过程中,为保证实验条件相同,每个测点的岩石分别钻取相同规格的试样( $O_{25} \times 50mm$ ),试样两端不平行度误差小于  $10\mu m$ ,且加载条件相同。塔北油区井下及地表不同岩性

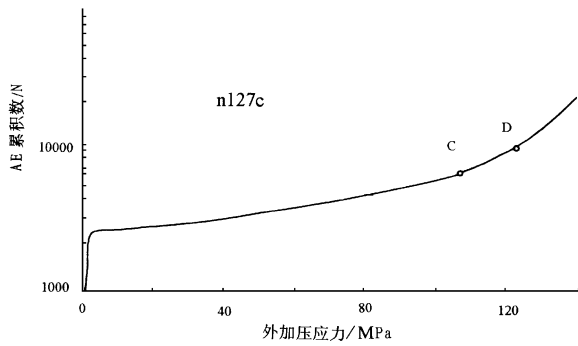


图 6 利用半对数法判断过渡点 C D

Fig. 6 Determination of C, D by means of semilogarithmic method

的岩石声发射全过程测量结果见表 2 与 Boyce 测量结果相比,塔北油区所采样品声发射全过程特征以 I、III 型为主,平均岩石抗压强度在 100 MPa 以上,各试样 C 点集中在 8% 左右,反映了岩石裂纹稳定扩展阶段相对出现较晚,对扩大岩石凯瑟效应测量的范围十分有利。泥岩和砂岩 I 型和 III 型两种声发射全过程特征均有显现,其中 I 型的砂岩、泥岩抗压强度明显大于 III 型的砂岩、泥岩的抗压强度(表 3)

砂岩所表现出的这两种声发射全过程曲线特征与其致密程度有关,如果砂岩致密,其声发射全过程曲线特征倾向于 I 型;如果砂岩颗粒较粗且胶结不紧密,在加载变形过程中的颗粒错动将产生很大的声发射信号,结果将使线弹性变形阶段的声发射信号加大,无法区分 B 点而表现出 III 型特征。泥岩出现 III 型特征的岩石可分为两种情况,一种是泥岩颗粒粗且含有砂质,加载过程中声发射信号很大,导致岩石裂纹闭合阶段与线弹性变形阶段无法区别;另一种情况则相反,由于泥岩颗粒较细,而岩石中的微裂纹较少,在加载过程中裂纹闭合阶段与线弹性变形阶段声发射信号均非常弱。

表 3 新疆塔北不同类型砂岩、泥岩抗压强度对比表

Table 3 The comparison of  $\sigma_c$  between different type of sandstones and mudstone in North Tarim

岩性	I 型抗压强度 $\sigma_{dI}$ (MPa)	III 型抗压强度 $\sigma_{dIII}$ (MPa)	抗压强度比 ( $\sigma_{dIII} / \sigma_{dI}$ )
砂岩	151.0	106.2	70.3%
泥岩	145.9	110.8	75.9%

由于沉积岩的致密程度通常与其沉积压实过程有关,而采自现今深度的样品无法代表其整个沉积历史过程,因此以砂岩为例,将其按时代分组讨论声发射全过程曲线出现特征(表 4 表 5 表 6)。其结果新生代样品中砂岩 III 型全过程曲线出现率最高为 43%,中生代样品出现率为 29%,而中生代以前的古老岩石平均抗压强度达到 184.5 MPa,且表现出较好的 I 型特征,由此可证明,砂岩的声发射全过程特征与沉积压实过程有密切关系。

表 4 新疆塔北新生代砂岩声发射类型统计表

Table 4 AE type statistic table of Cenozoid sandstone specimens in the North Tarim Basin

编号	岩性	时代	埋深 (m)	$\epsilon_c$ (MPa)	AE曲线类型	AB- BC	BG- CD	CD- DF
N116	黄褐色泥质砂岩	N <sub>1j</sub>	3980	127.3	III	-	84.6%	90.7%
N34	红色粗砂岩	N <sub>2q</sub>	0	149.7	I	2.3%	87.6%	94.3%
N78-2	蓝灰色砂岩	N <sub>1k</sub>	0	171.6	I	5.0%	88.8%	96.2%
N91	粉红色长石砂岩	N <sub>1k</sub>	0	57.0	III	-	83.1%	93.1%
N90	褐色含砾砂岩	E	0	142.6	I	4.6%	82.1%	98.6%
N128	褐色粉砂岩	N <sub>1j</sub>	3845	64.6	II	5.1%	-	96.1%
N76	蓝灰色砂岩	N <sub>1j</sub>	0	93.2	III	-	95.4%	98.0%

岩石声发射全过程曲线类型是由多种因素共同作用的结果,它既与岩石的岩性有关,也与岩石经历的地质活动密切相关。因此在每个声发射地应力测量地区进行声发射全过程类型统计很有必要,同时声发射全过程曲线在每个测区或成岩环境相似的地区存在较好的一致性。

表 5 新疆塔北中生代砂岩声发射类型统计表

Table 4 AE type statistic table of Mesozoid sandstone specimens in the North Tarim Basin

编号	岩性	时代	埋深 (m)	$\epsilon_c$ (MPa)	AE曲线类型	AB- BC	BG- CD	CD- DF
N129	褐色砂岩	K <sub>1kp</sub>	4153	117.0	I	1.7%	91.4%	94.9%
N153	灰色砂岩	K <sub>1kp</sub>	5262	83.5	I	1.8%	88.4%	95.2%
N115	深灰色泥质粉砂岩	J	4430	88.0	I	2.7%	82.7%	90.3%
N139	浅灰色含砾中砂岩	T	4657	91.0	III	-	94.6%	96.8%
N63	黄绿色砂岩	T <sub>2-3k</sub>	0	106.9	I	6.7%	89.5%	96.2%
N67	灰绿色砂岩	J <sub>2q</sub>	0	150.8	I	4.0%	91.8%	97.6%
N87	灰色中薄层砂岩	J <sub>2q</sub>	0	229.7	I	2.0%	85.8%	90.0%
N83	灰色中薄层砂岩	T <sub>2-3k</sub>	0	207.3	III	-	88.4%	94.8%
N85	深灰色砂岩	T <sub>3x</sub>	0	214.9	I	4.0%	88.4%	94.3%
N75	暗红色砂岩	K <sub>2</sub> -E	0	113.1	III	-	88.5%	98.1%
N137	灰绿色砂岩	T	5332	133.5	I	-	77.7%	91.5%
N68-2	灰黄色含砾粗砂岩	J <sub>2q</sub>	0	71.8	III	-	83.0%	93.6%
N65	灰绿色厚层状砂岩	J <sub>1y</sub>	0	74.4	I	4.0%	84.9%	89.0%
N62	黄绿色砂岩	T <sub>1</sub>	0	161.4	I	3.7%	90.3%	94.7%
N86	浅灰色巨厚砂岩	J <sub>1</sub>	0	168.1	III	-	88.2%	95.4%
N118	砂岩	J	5309	82	III	-	82.9%	89.6%
N117	红褐色砂岩	K <sub>1kp</sub>	4970	65	III	-	78.9%	93.7%
N98	灰褐色砂岩	K <sub>2</sub> -E	0	130.3	I	2.7%	93.8%	98.2%
N94	灰绿色砂岩	T <sub>3h</sub>	0	175.7	I	3.4%	87.0%	92.8%
N96	灰绿色中细砂岩	T <sub>1a</sub>	0	111.0	I	3.6%	87.2%	93.6%
N95	深灰色砂岩	T <sub>3h</sub>	0	210.7	I	3.5%	89.9%	95.7%
N102	紫红色砂岩	K <sub>2-3q</sub>	0	87.6	I	3.4%	92.5%	97.7%
N103	灰色砂岩	T <sub>2k</sub>	0	118.2	I	3.4%	89.6%	97.4%
N101	紫红色砂岩	K <sub>2-3q</sub>	0	117.1	I	2.6%	90.4%	95.6%

表 6 新疆塔北古生代砂岩声发射类型统计表

Table 6 AE type statistic table of Palaeozoic sandstone specimens in the North Tarm Basin

编号	岩性	时代	埋深 (m)	$\epsilon_c$ (MPa)	AE曲线类型	AB- BC	BG- CD	CD- DF
N42	灰绿色中砂岩	S	0	194.0	I	2.1%	92.8%	96.6%
N20	灰黄褐色中层砂岩	C <sub>3k</sub>	0	220.0	I	2.7%	89.1%	95.8%
N27	紫红色中层砂岩	D	0	139.5	I	3.2%	89.1%	94.5%
N8	灰褐色厚层砂岩	S <sub>2-3</sub>	0	223.1	I	3.6%	89.0%	95.9%
N14	灰褐色石英砂岩	Dy	0	143.6	I	6.4%	86.7%	93.7%
N13	紫红色粉砂岩	Dy	0	266.9	I	2.4%	89.9%	95.7%
N36	紫红色砂岩	S	0	304.0	I	2.3%	78.9%	89.6%
N15	灰褐色砂岩	Dy	0	79.5	I	7.2%	82.5%	89.8%
N147	灰白色砂岩	S- D	5152	89.6	III	-	76.0%	83.8%

## 5 应用

岩石声发射类型是岩石本身固有的特征,它与多种因素有关。对岩石声发射类型的确定是声发射法古今地应力测量的基础,对测量结果的可靠性提供了保障。

在岩石达到破坏以前,均存在一个声发射信号强烈增长的过程,监测这个过程对岩爆的发生以及水库大坝的稳定研究有很大的价值,为此选择有良好 G-D点过渡特征的I型和III型岩体进行监测,则有利于预测这类灾害。

## 参 考 文 献

- 1 丁原辰,张大伦.以声发射估计岩石试样先存应力的新方法.现代地质——中国地质大学研究生院学报,1989,3(3): 359-368
- 2 Boyce G M, McCabe W M, Koerner R M. Acoustic Emission Signatures of Various Rock Types in Unconfined Compression. In Dmievich V P, Gray R E, eds. Acoustic Emissions in Geotechnical Engineering Practice. ASTM STP 750, 1981, 142-154

# ACOUSTIC EMISSION SIGNATURES OF VARIOUS ROCK TYPES FROM THE NORTH TARIM BASIN

Shao Zhaogang Ding Yuanchen

(*Institute of Geomechanics, CAGS*)

**Abstract** AE characteristics and classification of curves of total AE accounts versus applied stress for rock specimens from the North Tarim Basin during the whole process of loading are discussed in the paper. It is put forward that four methods can be used to determine the AE curve types of rocks. A statistical analysis of the results for rock samples collected from the wells and surfaces in the North Tarim Basin Oil Field shows the presence of “I” and “III” curve types of AE curves for sandstone and mudstone and “I” type for dolomite, limestone and basalt in the area.

**Key words** acoustic emission, Kaiser effect, rock stress

## 第一作者简介

邵兆刚,男,1970年生,工程师。1992年毕业于中国地质大学(武汉)物探系,在职硕士生。主要从事石油地质、岩石力学、地应力测量等方面工作。通讯地址:北京市海淀区民族学院南路11号地质力学研究所。邮政编码:100081

---

## 西昆仑瓦卡地区发现蛇绿岩带

**【本刊讯】** 1997年,地质力学研究所李锦蓉研究员在国家 305项目(编号:96-915-06-02)专题研究中,在塔什库尔干瓦卡地区发现古生代蛇绿岩带。该带沿安大力塔克断裂带南侧呈NW-SE分布,出露宽度10余千米。下部为巨厚层状辉长岩,少量辉橄岩;中部为基性岩墙、枕状玄武岩和玄武安山岩;上部是巨厚的硅质岩夹红色的碧玉岩和蛇绿岩混杂岩,并见蛇绿岩墙的穿入。蛇绿岩带的顶、底板为断层接触,带中见有花岗闪长岩或花岗岩侵入辉长岩和硅质岩中。该带三套基本岩性单元组合与典型的蛇绿岩套基本吻合,但是构造的叠置、改造作用更为强烈。

在麻扎以西康西瓦缝合带上的瓦卡地区,发现蛇绿岩尚属首次。这一发现对研究特提斯洋盆的开合,“弧-弧”、“弧-陆”碰撞将提供新的证据。

(李锦蓉供稿)